



بررسی قابلیت پارامترهای مختلف امواج التراسونیک در ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و دوام سنگ‌های کربناته

میلاذ بشیری گودرزی^۱، مرتضی هاشمی^{۲*}، امین جمشیدی^۳

پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۱۸

دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۲۲

چکیده

در این تحقیق با تحلیل سیگنال امواج التراسونیک و استخراج پارامترهای مختلف التراسونیک در نه سنگ کربناته متعلق به مناطق مختلف ایران، قابلیت این پارامترها در تعیین و ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و دوام سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور در ابتدا ویژگی‌های پتروگرافی، فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه تعیین شد و سپس برای تعیین دوام، این سنگ‌ها در معرض آزمایش دوام شکستگی تا ۱۵ چرخه و آزمایش دوام در مقابل چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن تا ۵۰ چرخه قرار گرفتند. همچنین با استفاده از یک دستگاه دقیق التراسونیک با قابلیت ثبت سیگنال موج، سنگ‌ها قبل و بعد از چرخه‌های تر و خشک شدن مورد آزمایش التراسونیک قرار گرفتند و پارامترهای مختلف التراسونیک شامل سرعت موج تراکمی (VP)، دامنه حداکثر موج (Amax)، میرایی فاصله‌ای موج (α_s) و میرایی زمانی موج (α_t) از سیگنال‌های ثبت شده، تعیین و استخراج گردید. بررسی رابطه بین پارامترهای التراسونیک و ویژگی‌های سنگ‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد پارامترهای التراسونیک ویژگی‌های فیزیکی را با دقت بیشتری نسبت به ویژگی‌های مکانیکی پیش‌بینی می‌کنند. همچنین VP در مقایسه با سایر پارامترها، بهتر می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی را پیش‌بینی کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد پارامترهای Amax و α_s توسعه ریزترک‌های ناشی از چرخه‌های تر و خشک شدن و پیشرفت هوازگی در سنگ را بهتر از VP آشکار می‌کنند. از طرف دیگر α_t نسبت به پیشرفت هوازگی در سنگ حساس نیست اما با اصلاح و تبدیل آن به α_{tc} این پارامتر نیز می‌تواند به خوبی پیشرفت هوازگی در سنگ را آشکار کند.

کلیدواژه‌ها: سنگ‌های کربناته، سرعت موج، دامنه موج، میرایی موج، دوام

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان m-hashemi@sci.ui.ac.ir

۳. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

نسبت سرعت، انرژی موج و میرایی، مقاومت دو نمونه سنگ آهک و دولومیت را مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که در سنگ آهک بهترین پارامتر برای تعیین مقاومت، نسبت سرعت موج است در صورتی که در سنگ دولومیت پارامتر انرژی موج همبستگی بیشتری با مقاومت دارد.

مارتینز-مارتینز و همکاران (Martínez-Martínez et al., 2011) خصوصیات پتروگرافی و درجه زوال ده نوع سنگ دولومیت و آهک را با استفاده از پارامترهای سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی، نسبت سرعت، انرژی موج و میرایی زمانی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد گرچه سرعت موج تراکمی در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته بود اما این پارامتر نتایج غیر دقیقی برای ارزیابی خصوصیات پتروگرافی و درجه زوال سنگ‌ها ارائه می‌کند. بنابراین آنها پارامتر جدیدی با عنوان میرایی فاصله‌ای را ارائه نمودند که به شدت به خصوصیات پتروگرافی و درجه زوال سنگ‌ها حساس است و می‌توان بر اساس آن میزان زوال سنگ را با دقت مورد ارزیابی قرار داد.

مارتینز-مارتینز و همکاران (Martínez-Martínez et al., 2012) با استفاده از روش امواج التراسونیک به تخمین و پیش‌بینی مدول الاستیک ده نوع سنگ آهک پرداختند. آنها همچنین در طول مطالعات خود، سنگ‌ها را در معرض فرایندهای هوازدگی مصنوعی تبلور نمک و هوازدگی ناشی از شوک حرارتی قرار دادند و مدول‌های استاتیکی و دینامیکی سنگ‌ها قبل و بعد از هوازدگی را تعیین نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد رابطه ضعیفی بین مدول‌های استاتیکی (E_{st}) و دینامیکی (E_d) سنگ‌ها وجود دارد. در نهایت این محققین یک رابطه جدیدی را ارائه نمودند که بر اساس آن و با استفاده از دو پارامتر مدول دینامیکی و میرایی فاصله‌ای می‌توان مدول استاتیکی سنگ‌های مورد مطالعه را با دقت بالا تعیین نمود.

مارتینز-مارتینز و همکاران (Martínez-Martínez et al., 2013) در یک تحقیق به پایش تحولات ده نوع سنگ کربناته در طول فرایند هوازدگی مصنوعی ذوب و یخبندان پرداختند. در این تحقیق در پایان هر یک از سیکل‌های ذوب و یخبندان،

در سال‌های اخیر آزمایش‌های غیرمخرب اهمیت ویژه‌ای در تعیین ویژگی‌های مختلف سنگ‌ها داشته‌اند و این اهمیت موجب تاکید بر افزایش دانش در رابطه با این آزمایش‌ها گردیده است؛ از مهمترین آزمایش‌های غیرمخرب می‌توان به آزمایش امواج التراسونیک به عنوان روشی آسان و اقتصادی که در صحرا و آزمایشگاه کاربرد دارد، اشاره نمود. داده‌هایی که از آزمایش‌های التراسونیک به دست می‌آیند به ویژگی‌های مختلف سنگ مانند اندازه بلور، تخلخل، وجود شکستگی‌ها، هوازدگی و سایر موارد مشابه وابسته است (Martínez-Martínez et al., 2011). در مطالعات قبلی انجام شده در رابطه با تاثیرات ویژگی‌های سنگ بر انتشار امواج التراسونیک، بیشتر از پارامتر سرعت موج (V_p یا V_s) استفاده شده است، در صورتیکه سرعت موج التراسونیک به تنهایی ارزیابی کاملی از فرآیند انتقال موج نمی‌دهد (Benavente et al., 2006). علاوه بر سرعت انتشار موج، پارامترهای زیاد دیگری وجود دارد که می‌توان از سیگنال ثبت شده در آزمایش به دست آورد، به عنوان مثال پارامترهایی مانند دامنه حداکثر موج، انرژی موج و میرایی موج را می‌توان از سیگنال‌ها استخراج نمود و بر اساس آن ویژگی‌های سنگ را مورد ارزیابی قرار داد. از آنجا که هر یک از این پارامترها نسبت به برخی ویژگی‌های سنگ حساسیت بیشتری دارند، بنابراین با در نظر گرفتن همزمان چند پارامتر از امواج التراسونیک می‌توان ویژگی‌های مختلف سنگ را با دقت بیشتری مورد بررسی و ارزیابی قرار داد (Martínez-Martínez et al., 2011).

در ارتباط با آزمایش غیر مخرب امواج التراسونیک تا کنون مطالعات بسیار زیادی انجام شده است که در بیشتر این مطالعات برای ارزیابی سنگ‌های مورد مطالعه تنها از پارامتر سرعت عبور موج استفاده شده است (به عنوان مثال Karakul and Ulusay, 2013; Pappalardo, 2015; Azimian and Ajalloeian, 2015; Vasanelli et al., 2015; Jamshidi et al., 2016; Gafoori et al., 2018). همچنین در تعداد محدودی از مطالعات، از سایر ویژگی‌های موج نیز برای بررسی و ارزیابی استفاده شده است. بناوخته و همکاران (Benavente et al., 2006) با استفاده از پنج پارامتر حاصل از آزمایش امواج التراسونیک شامل سرعت موج تراکمی، سرعت موج برشی،

در تحقیق حاضر قابلیت پارامترهای مختلف التراسونیک در تعیین و ارزیابی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی و دوام سنگ های کربناته مورد بررسی قرار گرفته است.

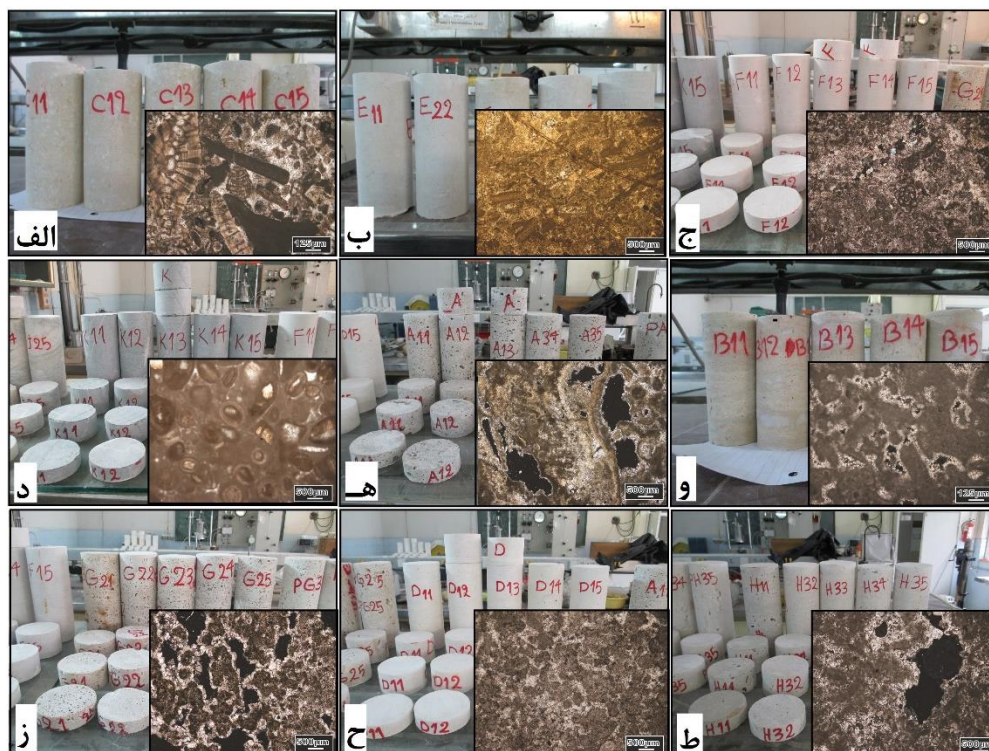
۲. مواد و روش ها

۲-۱. سنگ های مورد مطالعه

در این تحقیق ۹ سنگ کربناته شامل ۴ نمونه سنگ آهک و ۵ نمونه سنگ تراورتن مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. این سنگ ها از شهرک سنگ های ساختمانی محمودآباد اصفهان که در آن انواع سنگ های ساختمانی از اقصی نقاط ایران موجود است، تهیه شده اند. سنگ های آهک شامل آهک آباده ۱ (L1)، آهک آباده ۲ (L2)، آهک سمیرم (L3) و آهک اوزوار (L4) و سنگ های تراورتن شامل تراورتن یزد (T1)، تراورتن ابرکوه (T2)، تراورتن دهشیر (T3)، تراورتن رامشه (T4) و تراورتن دامغان (T5) است. این سنگ ها به عنوان سنگ نما در بازار سنگ های ساختمانی ایران به فروش می رسند. برای هر نوع سنگ حداقل ۳ بلوک به ابعاد تقریبی $20 \times 30 \times 30$ تا $30 \times 40 \times 40$ سانتی متر تهیه شد. پس از انتقال بلوک های سنگ به آزمایشگاه، نمونه های استوانه ای به قطر ۵۴ میلی متر از آنها تهیه شد (شکل ۱). ویژگی های پتروگرافی هر یک از سنگ ها به وسیله بررسی های میکروسکوپی مقاطع نازک تعیین گردید. برای این منظور برای هر سنگ ۲ مقطع نازک تهیه شد و سپس با استفاده از میکروسکوپ نوری، ویژگی های پتروگرافی سنگ ها شامل ترکیب کانی شناسی و بافت مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. بررسی های میکروسکوپی نشان می دهد کلسیت کانی اصلی تشکیل دهنده سنگ های مورد مطالعه است و در برخی موارد، دولومیت به عنوان کانی فرعی مشاهده می شود. تصاویر مقاطع نازک در شکل ۱ و ویژگی های پتروگرافی نمونه ها در جدول ۱ ارائه شده است.

ویژگی های مختلف نمونه ها شامل کاهش حجم، تغییر تخلخل، شکل ظاهری، مقاومت تک محوری، مدول الاستیسیته و ویژگی های انتشار امواج التراسونیک شامل سرعت موج تراکمی و میرایی فاصله ای اندازه گیری شد. بررسی این محققین نشان داد هیچ یک از پارامترهای پتروفیزیکی اندازه گیری شده در طول فرایند هوازدگی، نمی توانند نزدیک شدن به شرایط حدی زوال را پیش بینی نمایند، در صورتیکه پارامتر میرایی فاصله ای حاصل از امواج التراسونیک به عنوان یک پارامتر حساس، به خوبی رسیدن به شرایط حدی قبل از شکست را پیش بینی می نماید.

وانگ و همکاران (Wang et al., 2017) با استفاده از روش زمان-فرکانس (time-frequency) امواج التراسونیک، تغییر خصوصیات ماسه سنگ ها در اثر هوازدگی ناشی از یخبندان را مورد مطالعه قرار دادند. این محققین با استفاده از پارامترهای سرعت موج تراکمی، دامنه سرموج، فرکانس ستروئید و پیک طیف فرکانس موج به مطالعه پیشرفت هوازدگی و تخریب خصوصیات ماسه سنگ در طول چرخه های یخبندان و ذوب پرداختند. نتایج این محققین نشان داد، پارامترهای مختلف موج در روش زمان-فرکانس، کارایی مناسبی در پیش بینی و تخمین میزان تخریب درونی سنگ در هر چرخه در اثر هوازدگی یخبندان دارند. هاشمی و همکاران (Hashemi et al., 2018) کارایی چکش اشمیت در ارزیابی دوام سنگ های ساختمانی کربناته در مقابل هوازدگی ناشی یخبندان و ذوب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد، تلفیق دو آزمایش غیرمخرب چکش اشمیت و اندازه گیری های التراسونیک به خوبی می تواند دوام سنگ های مورد مطالعه را در مقابل یخبندان پیش بینی کند.



شکل ۱. تصویر نمونه‌های دستی و مقطع نازک سنگ‌های مورد مطالعه. الف L1، ب L2، ج L3، د L4، ه T1، و T2، ز T3، ح T4، ط T5

جدول ۱. نام، ترکیب کانی شناسی و بافت نمونه‌های مورد مطالعه

Sample code	Commercial Name	Rock type	Mineral composition	Texture
L1	Abadeh Limestone 1	Limestone	Calcite	Packstone to Grainstone
L2	Abadeh Limestone 2	Limestone	Calcite	Packstone
L3	Semirom Limestone	Limestone	Calcite	Packstone
L4	Ozovar Limestone	Limestone	Calcite	Packstone to Grainstone
T1	Yazd Travertine	Travertine	Calcite (90%), Dolomite (10%)	Crystalline
T2	AbarKouh Travertine	Travertine	Calcite	Crystalline
T3	Dehshir Travertine	Travertine	Calcite	Crystalline
T4	Ramsheh Travertine	Travertine	Calcite	Crystalline
T5	Damghan Travertine	Travertine	Calcite	Crystalline

و غوطه‌ور سازی مطابق با توصیه‌های (ISRM 1981) انجام شد. برای این منظور در ابتدا حجم کل نمونه‌های استوانه‌ای شکل با استفاده از اندازه‌گیری دقیق ابعاد آن‌ها تعیین شد. سپس وزن اشباع نمونه‌ها، بعد از ۴۸ ساعت غوطه‌وری در آب، تعیین شد. وزن خشک نمونه‌ها نیز پس از آنکه نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در درون آن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داشتند،

۲-۲. تعیین خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها

خصوصیات فیزیکی از جمله خصوصیات مهم سنگ‌ها هستند که سایر خصوصیات سنگ مانند خصوصیات مکانیکی و دوام آن‌ها را کنترل می‌کنند. بنابراین خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها شامل وزن واحد حجم کل (ρ_b)، وزن مخصوص ذرات (ρ_s)، تخلخل کل (n_t)، تخلخل موثر (n_e) و جذب آب (w_{abs}) تعیین شد. تعیین وزن واحد حجم کل و تخلخل موثر با روش اشباع

PicoScope) که از مبدل های فرستنده و گیرنده و همچنین یک اوسیلوسکوپ تشکیل شده و قادر است شکل امواج (Waveforms) را به دست آورده و برای استفاده های آتی رقومی و ذخیره نماید، استفاده شد. امواج التراسونیک مطابق با روش پیشنهادی بناونته و همکاران (Benavente et al., 2006) و مارتینز-مارتینز و همکاران (Martínez-Martínez et al., 2011) از درون نمونه های استوانه ای با قطر ۵۴ میلی متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ عبور داده شده و پارامترهای مختلف امواج عبوری اندازه گیری و تعیین شد. مبدل های فرستنده و گیرنده، غیرپلاریزه و دارای فرکانس ۸۰ کیلوهرتز می باشند. در طول انجام آزمایش برای اتصال بهتر دو طرف نمونه به مبدل ها، از ژل التراسونیک استفاده شد و نمونه ها به صورت عمودی بین دو مبدل فرستنده و گیرنده قرار گرفتند. وزن مبدل ها و نمونه در حالت عمودی، فشار تماسی لازم برای اتصال مناسب نمونه و مبدل ها را فراهم می کند. شکل ۲ وضعیت قرارگیری نمونه و مبدل ها در طول اندازه گیری های التراسونیک را نشان می دهد. با انجام آزمایش و ثبت نمودار رقومی موج، پارامترهای مختلفی شامل دامنه حداکثر موج (A_{max})، دامنه معادل ۱۰٪ دامنه حداکثر ($A_{10\%}$)، زمان رسید موج (T)، زمان متناظر با دامنه حداکثر (T_{max}) و زمان متناظر با دامنه ۱۰٪ ($T_{10\%}$) مطابق با روش پیشنهادی مارتینز-مارتینز و همکاران (Martínez-Martínez et al., 2011) از روی نمودار موج مطابق با شکل ۳ تعیین شد. در اختیار داشتن این پارامترها و همچنین طول نمونه ها (L)، سرعت امواج تراکمی (V_p)، میرایی فاصله ای (α_s) و میرایی زمانی (α_t) به ترتیب با استفاده از روابط ۴ تا ۶ محاسبه و تعیین شد:

$$V_p \text{ (m/s)} = L / T \quad (4)$$

$$\alpha_s \text{ (dB/cm)} = (20 \cdot \log(A_e/A_{max})) / L \quad (5)$$

$$\alpha_t \text{ (dB/ms)} = (20 \cdot \log(A_{max}/A_{10\%})) / (T_{max} - T_{10\%}) = 20 / (T_{max} - T_{10\%}) \quad (6)$$

در رابطه ۵، A_e دامنه حداکثر موج ورودی به نمونه سنگ است.

تعیین شد. وزن واحد حجم کل (ρ_b) و تخلخل موثر (n_e) با استفاده از روابط ۱ و ۲ به دست آمد:

$$\rho_b = M_s/V \quad (1)$$

$$n_e = ((M_{sat} - M_s)/\rho_w)/V \times 100 \quad (2)$$

که در آن M_s وزن خشک نمونه، M_{sat} وزن اشباع نمونه، V حجم کل نمونه و ρ_w وزن واحد حجم آب است. وزن مخصوص ذرات (ρ_s) نیز با روش پیکنومتری و با استفاده از پودر نمونه ها تعیین شد. تخلخل کل (n_t) نیز با توجه به رابطه بین وزن واحد حجم کل نمونه ها و وزن مخصوص ذرات با استفاده از رابطه ۳ تعیین شد:

$$n_t = (\rho_s - \rho_b)/\rho_s \quad (3)$$

که در آن ρ_b وزن واحد حجم کل و ρ_s وزن مخصوص ذرات جامد است. شایان ذکر است برای هر سنگ پنج نمونه مورد آزمایش های فیزیکی قرار گرفت و مقادیر میانگین به عنوان خصوصیات فیزیکی نمونه ها لحاظ گردید.

۲-۳. تعیین خصوصیات مکانیکی نمونه ها

خصوصیات مکانیکی نمونه ها شامل مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بارنقطه ای مطابق با روش های توصیه شده توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1981) تعیین شد. در آزمایش برزیلی از نمونه های استوانه ای با قطر ۵۴ میلی متر و نسبت قطر به ضخامت در حدود ۲ استفاده شد. برای انجام این آزمایش تعداد ۵ نمونه از هر نوع سنگ مورد استفاده قرار گرفت و مقدار میانگین به عنوان مقاومت کششی برزیلی هر سنگ در نظر گرفته شد. آزمایش بارنقطه ای نیز به روش طولی بر روی ۵ نمونه از هر سنگ با قطر ۵۴ میلی متر و نسبت طول به قطر ۰/۷ انجام شد و مقدار میانگین به عنوان شاخص بارنقطه ای هر سنگ لحاظ گردید. در محاسبه شاخص بار نقطه ای، تصحیح مربوط به اندازه قطر معادل انجام شده است.

۲-۴. آزمایش امواج التراسونیک

در این تحقیق از امواج التراسونیک و پارامترهای مختلف آن به منظور ارزیابی ویژگی های فیزیکی و مکانیکی و همچنین تغییرات درونی سنگ های مورد مطالعه در اثر چرخه های متوالی تر و خشک شدن استفاده گردید. برای این منظور از یک دستگاه التراسونیک بسیار دقیق (مدل WILLE GEOTECHNIK،

۲-۵. آزمایش‌های دوام

برای ارزیابی دوام سنگ‌های مورد مطالعه از دو آزمایش دوام شکستگی و دوام در مقابل چرخه‌های تر و خشک شدن مطابق با روش‌های استاندارد (ASTM (1994) استفاده شد. برای همه نمونه‌ها آزمایش دوام شکستگی تا چرخه ۱۵ انجام شد و بر اساس وزن خشک نمونه‌ها بعد از هر چرخه، شاخص دوام شکستگی (SDI) برای چرخه‌های ۲، ۵، ۱۰ و ۱۵ تعیین شد.

در آزمایش تر و خشک شدن، نمونه‌های استوانه‌ای در هر چرخه در ابتدا به مدت ۶ ساعت در درون آب مقطر و در دمای آزمایشگاه غوطه‌ور شدند و سپس به مدت ۲۴ ساعت در درون آون با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. این چرخه برای هر یک از سنگ‌های مورد مطالعه تا ۵۰ بار تکرار گردید و بنابراین سنگ‌ها در معرض ۵۰ چرخه تر و خشک شدن قرار گرفتند.

۳. نتایج

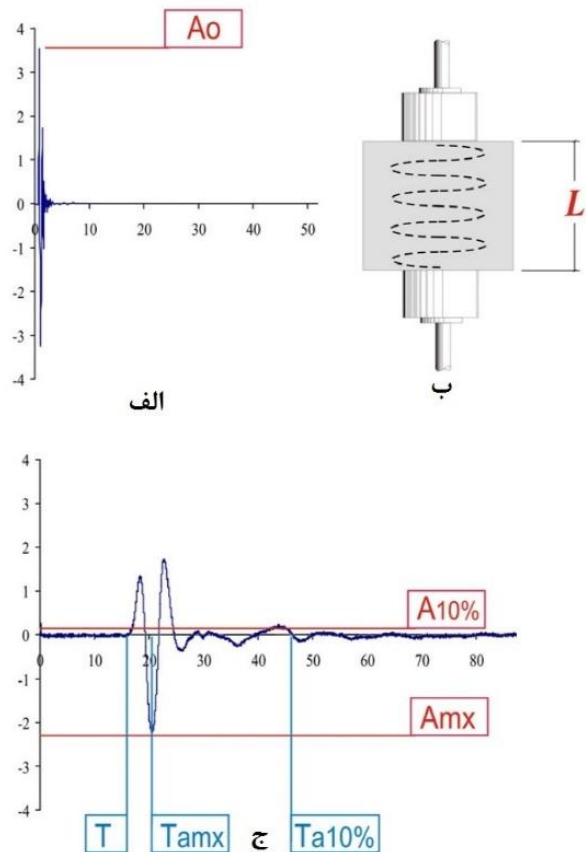
۳-۱. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی انجام شده بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، تخلخل کل سنگ‌های آهک کمتر از ۱۰٪ است. در بین سنگ‌های آهک، تخلخل کل نمونه L1 در حدود ۹٪ و سایر نمونه‌های آهک کمتر از ۴/۵٪ درصد است. این درحالی است که تخلخل موثر نمونه L1 در حدود ۶/۵٪ و سایر نمونه‌های آهک کمتر از ۱٪ است. نتایج همچنین نشان می‌دهد، تخلخل سنگ‌های تراورتن کمی بیشتر از سنگ‌های آهک است. تخلخل کل سنگ‌های تراورتن بین ۷/۵٪ تا ۱۵٪ درصد در تغییر است که کمترین مقدار متعلق به نمونه T3 و بیشترین آن متعلق به نمونه T5 است. از طرف دیگر تخلخل موثر نمونه T4 در حدود ۷/۴٪ و سایر نمونه‌های تراورتن کمتر از ۴٪ است (جدول ۲).



شکل ۲. وضعیت قرارگیری نمونه و مبدل‌ها در طول اندازه-

گیری‌های التراسونیک



شکل ۳. الف) دامنه حداکثر موج ارسال شده به نمونه، ب) وضعیت قرارگیری نمونه و مبدل‌های فرستنده و گیرنده، ج) نمودار موج دریافت شده از نمونه و نحوه تعیین $A_{10\%}$ ، A_{max} ، $T_{10\%}$ و T_{max} از نمودار موج (Martínez-Martínez et al., 2011)

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه های مورد مطالعه

Sample code.	n_e (%)	n_t (%)	ρ_s	ρ_b (g/cm ³)	W_{abs} (%)	BTS (MPa)	PLS (MPa)
L1	6.48	9.07	2.75	2.50	2.55	11.15	3.99
L2	0.61	1.20	2.72	2.69	0.22	11.65	4.31
L3	0.34	4.14	2.82	2.70	0.12	11.19	4.47
L4	0.25	0.51	2.72	2.71	0.03	12.40	4.78
L5	3.21	9.44	2.68	2.43	1.30	6.15	2.94
L6	3.38	9.10	2.76	2.51	1.32	9.22	3.69
L7	3.74	14.88	2.81	2.39	1.53	6.33	2.86
L8	7.38	12.91	2.74	2.39	3.03	8.97	3.53
L9	3.02	7.50	2.73	2.52	1.17	9.20	4.19

Effective porosity, n_e ; total porosity, n_t ; real density, ρ_s ; bulk density, ρ_b ; water absorption, w_{abs} ; Brazilian tensile strength, BTS; point load index, PLS

مرسوم، آزمایش دوام شکستگی معمولاً تا چرخه دوم انجام می شود (Franklin and Chandra, 1972; ASTM, 1994) اما تحقیقات برخی محققین نشان داده است که انجام آزمایش دوام شکستگی تا چرخه های بیشتر، نتایج واقعی تری از دوام سنگ ها را به دست می دهد (Gökceoğlu et al., 2000). در تحقیق حاضر برای مشاهده بهتر دوام نمونه های مورد مطالعه، آزمایش دوام شکستگی تا چرخه پانزدهم انجام شده است. نتایج آزمایش های دوام شکستگی نمونه های مورد مطالعه در چرخه های دوم، پنجم، دهم و پانزدهم در جدول ۳ و شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۳ ملاحظه می شود، دوام چرخه دوم تمامی نمونه های مورد مطالعه بیش از ۹۸ درصد است. بنابراین بر اساس رده بندی ارائه شده توسط گمبل (Gamble, 1971)، دوام نمونه های مورد مطالعه در رده خیلی زیاد قرار دارد. نتایج نشان می دهد اختلاف مقدار دوام نمونه ها در چرخه دوم کم است که این اختلاف با افزایش چرخه های آزمایش دوام، افزایش می یابد (شکل ۴). بیشترین مقدار اختلاف دوام نمونه ها مربوط به چرخه پانزدهم است که بر اساس آن می توان دوام نمونه ها مورد مطالعه را با دقت بیشتری بایکدیگر مقایسه کرد. بر اساس نتایج چرخه پانزدهم، نمونه های L2، L3 و L4 با دوام بیش از ۹۸ درصد، دارای بیشترین دوام هستند. سپس نمونه های T5 و L1 با دوام نزدیک به ۹۷ درصد در رده بعدی و نهایتاً نمونه های T1، T2، T3 و T4 با دوام بین ۹۵ تا ۹۶

بر اساس مقادیر تخلخل نمونه های مورد مطالعه آهک و تراورتن، می توان این سنگ ها را در رده سنگ های کم تخلخل قرار داد. نکته قابل توجه، اختلاف زیاد بین مقدار تخلخل کل و تخلخل موثر سنگ های مورد مطالعه است که این اختلاف در بیشتر موارد بیش از ۵۰ درصد است. اختلاف در مقدار تخلخل کل و تخلخل موثر، نشان دهنده ارتباط ضعیف بین حفرات سنگ است که این امر به نوبه خود سبب می شود بخش زیادی از حفرات سنگ ها توسط آب قابل دسترس نباشند (Benavente et al., 2015). میزان جذب آب نمونه ها این موضوع را به خوبی تأیید می کند. جذب آب نمونه L1 در حدود ۲/۵٪ و جذب آب سایر نمونه های آهک کمتر از ۱٪ است. در سنگ های تراورتن، جذب آب نمونه T4 در حدود ۳٪ و جذب آب سایر نمونه ها بین ۱٪ تا ۱/۵٪ است. همانطور که این مقادیر نشان می دهد، جذب آب توسط نمونه های مورد مطالعه بسیار کم است.

با توجه به شاخص بار نقطه ای و بر اساس طبقه بندی بنیواسکی (Bieniawski, 1989)، نمونه های تراورتن در رده سنگ ها با مقاومت متوسط و نمونه های آهک در رده سنگ های با مقاومت متوسط تا زیاد قرار می گیرند (جدول ۲).

۲-۳. دوام نمونه ها

برای ارزیابی دوام نمونه ها، آزمایش دوام شکستگی و آزمایش تر و خشک کردن انجام شد. بر اساس استانداردها و روش های

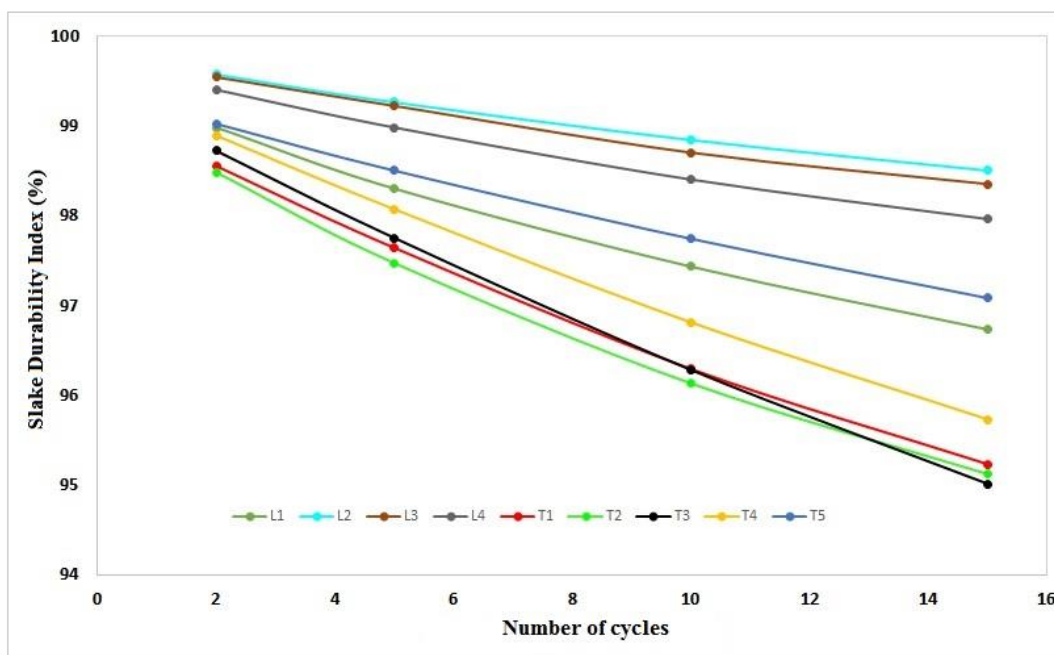
شاخص تغییر وزن فراهم نگردید. با توجه به نتایج به دست آمده و عدم امکان ارزیابی دوام نمونه‌ها با استفاده از روش‌های مرسوم، دوام نمونه‌های مورد مطالعه در مقابل چرخه‌های تر و خشک شدن با استفاده از روش غیر مخرب امواج التراسونیک مورد بررسی قرار گرفت که جزئیات آن در بخش بعد شرح داده شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش دوام شکستگی نمونه‌ها

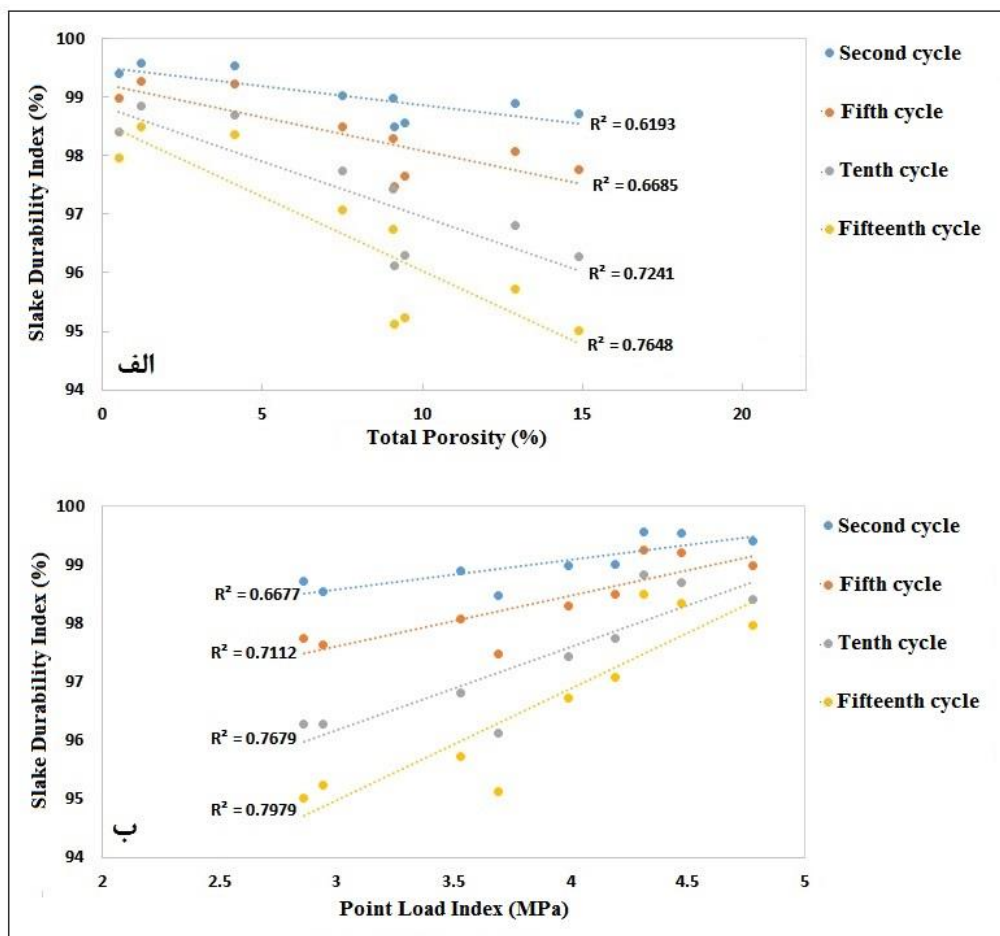
Sample code	SDI ₂ (%)	SDI ₅ (%)	SDI ₁₀ (%)	SDI ₁₅ (%)
L1	98.98	98.30	97.43	96.73
L2	99.57	99.26	98.84	98.50
L3	99.54	99.22	98.70	98.35
L4	99.40	98.98	98.40	97.96
T1	98.55	97.64	96.29	95.23
T2	98.48	97.47	96.13	95.12
T3	98.72	97.75	96.28	95.01
T4	98.89	98.07	96.81	95.73
T5	99.02	98.50	97.74	97.08

درصد دارای کمترین دوام در بین نمونه‌های مورد مطالعه هستند. به صورت کلی سنگ‌های آهک به نسبت سنگ‌های تراورتن دارای دوام بیشتری هستند. از این بین بیشترین دوام مربوط به سنگ L2 و کمترین دوام مربوط به سنگ T3 است. مقایسه خصوصیات فیزیک و مکانیکی نمونه‌ها با دوام آن‌ها (جدول ۲ و ۳ و شکل ۵) نشان می‌دهد ارتباط مستقیمی بین مقدار دوام نمونه‌ها و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها وجود دارد؛ به این صورت که سنگ‌های دارای کمترین تخلخل و بیشترین مقاومت، دارای بیشترین دوام نیز هستند و بالعکس. نتایج نشان می‌دهد با افزایش چرخه‌های دوام شکستگی، همبستگی بین شاخص دوام و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این نتیجه به نوبه خود تأیید کننده واقعی تر بودن شاخص دوام در چرخه‌های بالاتر است.

برای ارزیابی دوام سنگ‌های مورد مطالعه آزمایش تر و خشک کردن نیز علاوه بر آزمایش دوام شکستگی انجام شد. بعد از ۵۰ چرخه آزمایش تر و خشک کردن، هیچگونه تغییری در ظاهر نمونه‌ها مشاهده نشد و همچنین نمونه‌ها دچار تغییر وزن قابل توجهی نشدند. بنابراین امکان ارزیابی دوام نمونه‌ها بر اساس



شکل ۴. تغییرات شاخص دوام شکستگی نمونه‌ها با افزایش چرخه‌های آزمایش



شکل ۵. همبستگی بین شاخص دوام شکستگی و خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها (الف) و خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها (ب)

تراکمی در نمونه‌های مورد مطالعه در رده خیلی زیاد ($V_p > 5 \text{ km/s}$) قرار دارد (Anon, 1979). دامنه حداکثر موج (A_{max}) نمونه‌ها بین ۲۷ تا ۳۰۹ میلی‌ولت در تغییر است. A_{max} امواج عبوری از نمونه‌ها به دامنه حداکثر موج ارسال شده از فرستنده (A_e)، طول نمونه و وضعیت ناپیوستگی‌های درون نمونه بستگی دارد (Benavente et al., 2006; Martínez-). با توجه به اینکه مقدار A_e برای همه نمونه‌ها یکسان بوده است و از آنجا که وجود هر نوع تخلخل fractures, vugs or (شامل) در سنگ (Martínez et al., 2011). کاهش انرژی و کاهش دامنه موج می‌شود (Martínez-). بنابراین مقدار A_{max} مشاهده شده تابع تخلخل سنگ‌های مورد مطالعه است.

۳-۳. اندازه‌گیری‌های التراسونیک

ویژگی‌های امواج التراسونیک عبوری از نمونه‌ها با یک دستگاه دقیق اندازه‌گیری شد (شکل ۲). این اندازه‌گیری‌ها بر روی نمونه‌های استوانه‌ای و در دو مرحله قبل و بعد از چرخه‌های تر و خشک شدن انجام شده است. در اندازه‌گیری‌های التراسونیک پارامترهای سرعت موج تراکمی (V_p)، حداکثر دامنه موج (A_{max})، میرایی فاصله‌ای (α_s) و میرایی زمانی (α_t) موج اندازه‌گیری و تعیین شده و قابلیت هر یک از این پارامترها در ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی و دوام سنگ‌های مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج اندازه‌گیری‌های التراسونیک قبل از چرخه‌های تر و خشک شدن در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، V_p نمونه‌های مورد مطالعه بین ۴/۹۳۸ تا ۶/۷۴۵ کیلومتر در ثانیه در تغییر است. بر اساس این شاخص، سرعت امواج

جدول ۴. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای التراسونیک قبل از چرخه‌های تر و خشک شدن

Sample code	V_p (km/s)	A_{max} (mV)	α_s (dB/cm)	$A_{10\%}$ (mV)	$T_{A_{max}}$ (ms)	$T_{A_{10\%}}$ (ms)	α_t (dB/ms)
L1	5.283	27.63	3.01	2.49	0.20	4.01	5.48
L2	6.531	308.74	1.38	30.77	0.19	2.33	9.36
L3	6.482	147.74	1.90	15.23	0.15	2.76	7.58
L4	6.745	194.91	1.75	19.12	0.11	2.20	9.64
T1	5.012	64.86	2.47	6.54	0.47	3.40	6.80
T2	5.954	73.31	2.43	7.03	0.47	4.10	5.61
T3	4.938	38.75	2.80	4.20	0.36	2.76	8.03
T4	5.342	32.11	2.88	3.20	1.18	3.94	7.24
T5	5.753	74.18	2.39	7.11	0.74	3.64	7.01

زمانی (α_t) سنگ‌های مورد مطالعه نیز بین ۵/۴۸ تا ۹/۶۴ dB/ms متغیر است. کمترین مقدار مربوط به نمونه L1 و بیشترین مقدار مربوط به L4 است.

پس از تعیین مقدار پارامترهای مختلف التراسونیک، همبستگی این پارامترها با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها همبستگی بیشتری با V_p در مقایسه با سایر پارامترهای التراسونیک دارند. بررسی دقیقتر نشان می‌دهد ضرایب همبستگی رابطه V_p با تخلخل کل، دانسیته کل و تخلخل موثر از ضرایب همبستگی رابطه V_p با مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای بیشتر است. بر این اساس می‌توان بیان نمود که V_p با خصوصیات فیزیکی همبستگی بیشتری به نسبت خصوصیات مکانیکی دارد.

از بین خصوصیات مکانیکی، V_p همبستگی بیشتری با شاخص بار نقطه‌ای در مقایسه با مقاومت کششی برزیلی دارد. پارامترهای α_s و A_{max} نیز همانند V_p همبستگی زیادی با ویژگی‌های فیزیکی دارند. اما همبستگی این دو پارامتر با مقاومت کششی برزیلی و شاخص بار نقطه‌ای بسیار ضعیف است. این نتیجه مشاهده شده بیانگر این موضوع است که مقاومت سنگ تاثیر چندانی در میرایی موج عبوری ندارد و میرایی موج تابع تخلخل و ناپیوستگی‌های سنگ است. بنابراین پارامترهای التراسونیک α_s و A_{max} قادر به پیش‌بینی

در بین نمونه‌های مورد مطالعه، بزرگترین A_{max} (۱۵۰ تا ۳۰۹ میلی‌ولت) مربوط به سنگ‌های L2، L3 و L4 است. این نتیجه مشاهده شده را می‌توان به مقدار تخلخل کل این نمونه‌ها که مقدار بسیار کمی است (کمتر از ۴ درصد) ارتباط داد. از طرف دیگر کوچکترین A_{max} (۲۷ تا ۴۰ میلی‌ولت) مربوط به سنگ‌های L2، T3 و T4 است که باتوجه به تخلخل زیاد این سنگ‌ها (بین ۹ تا ۱۵ درصد) قابل توجیه است. A_{max} سنگ‌های T1، T2 و T5 نیز در محدوده بین ۶۴ تا ۷۵ میلی‌ولت در تغییر است که با مقدار تخلخل این سنگ‌ها که در محدوده ۴ تا ۹/۵ درصد متغیر است همخوانی دارد.

مقدار میرایی فاصله‌ای نمونه‌ها (α_s) بین ۱/۳۸ تا ۳/۰۱ dB/ms متغیر است. از آنجا که α_s تابع A_{max} است (رابطه ۵)، بنابراین تغییرات α_s نمونه‌ها با تغییرات A_{max} آن‌ها هماهنگ است. مقدار α_s با هوازگی سنگ‌ها دارای یک رابطه مستقیم است به این صورت که با افزایش میزان هوازگی سنگ‌ها مقدار α_s نیز افزایش می‌یابد (Martínez-Martínez et al., 2013). همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر α_s همه نمونه‌ها کمتر از ۴ dB/cm است (جدول ۴). بیشترین مقدار α_s مربوط به نمونه L1 است. این سنگ علاوه بر تخلخل زیاد، نشانه‌های از هوازگی خفیف نیز دارد. از طرفی کمترین مقدار α_s مربوط به نمونه L2 است که دارای تخلخل کم بوده و فاقد هوازگی است. در مجموع مقدار α_s سنگ‌های مورد مطالعه کم است و این مقادیر کم، نشان دهنده هوازگی بسیار کم این سنگ‌ها است. مقدار میرایی

وزن نمونه ها بعد از چرخه های تر و خشک شدن مشاهده نشد، اما انتظار می رود ساختار درونی نمونه ها دچار تغییراتی هر چند اندک شده باشد. بنابراین سعی شده است تغییرات درونی نمونه ها با کمک پارامترهای التراسونیک آشکار گردد. نتایج اندازه گیری های التراسونیک بعد از چرخه های تر و خشک شدن در جدول ۶ و شکل نمودارهای موج قبل و بعد از چرخه های تر و خشک شدن نیز در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود، دامنه امواج عبوری از نمونه ها پس از چرخه های تر و خشک شدن، کاهش یافته است.

خصوصیات مکانیکی سنگ ها با دقت قابل قبول نیستند. همانطور که جدول ۵ نشان می دهد، همبستگی ضعیفی بین α_t و ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگ وجود دارد که دلیل این امر می تواند مربوط به روش تعیین α_t (رابطه ۶) باشد. این موضوع در بخش بعد مورد بحث قرار خواهد گرفت. یکی از مهمترین اهداف این تحقیق ارزیابی دوام سنگ های مورد مطالعه با استفاده از پارامترهای التراسونیک است. برای این منظور اندازه گیری های التراسونیک بعد از چرخه های تر و خشک شدن نیز انجام شده و نتایج آن با اندازه گیری های قبل از چرخه ها مقایسه شده است. علیرغم آنکه تغییری در ظاهر و

جدول ۵. همبستگی بین پارامترهای مختلف التراسونیک و ویژگی های فیزیکی و مکانیکی نمونه ها

	V_p (km/s)	A_{max} (mV)	α_s (dB/cm)	α_t (dB/cm)
Total porosity (%)				
Bulk density (gr/cm³)				
Effective porosity (%)				
Brazilian Tensile Strength (MPa)				
Point Load Index (MPa)				

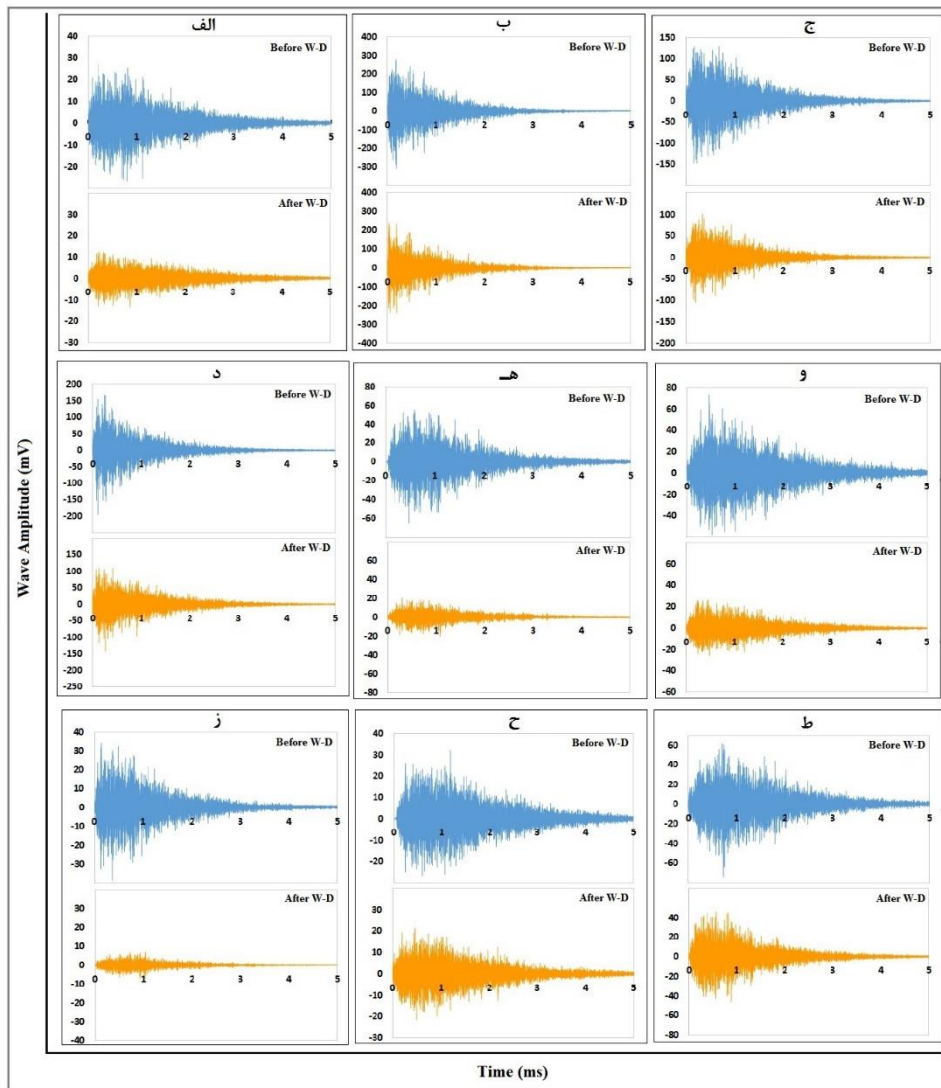
جدول ۶. نتایج اندازه‌گیری پارامترهای التراسونیک بعد از چرخه‌های تر و خشک شدن

Sample code	V_p (km/s)	A_{max} (mV)	α_s (dB/cm)	$A_{10\%}$ (mV)	$T_{A_{max}}$ (ms)	$T_{A_{10\%}}$ (ms)	α_t (dB/ms)
L1	4.872	13.02	3.49	1.32	0.87	4.09	6.19
L2	6.474	239.08	1.55	22.69	0.19	2.85	7.68
L3	6.393	102.58	2.14	9.73	0.19	2.93	7.47
L4	6.634	142.38	1.96	14.95	0.26	2.76	7.82
T1	4.621	20.71	3.25	2.13	1.07	3.01	10.13
T2	5.691	26.23	3.15	2.64	0.46	3.54	6.47
T3	3.873	7.19	3.93	0.74	1.02	3.49	8.01
T4	5.092	21.19	3.16	2.07	0.50	3.95	5.84
T5	5.463	46.09	2.72	4.66	0.57	3.16	7.67

مقدار تغییرات V_p است. نرخ تغییر A_{max} در سنگ‌های مورد مطالعه بین ۲۳ تا ۸۲ درصد است. کمترین نرخ تغییر A_{max} مربوط به نمونه L2 و بیشترین مقدار آن مربوط به نمونه T3 است. همانطور که در شکل ۶ نیز به خوبی قابل مشاهده است، تغییرات دامنه موج بعد از چرخه‌های تر و خشک شدن در نمونه‌های L2، L3 و L4 کم، در نمونه‌های T4 و T5 متوسط و در نمونه‌های L1، T1، T2 و T3 زیاد است. نرخ تغییرات α_s نیز بین ۱۰ تا ۴۰ درصد در تغییر است. روند تغییرات نرخ α_s در نمونه‌ها مطابق با روند تغییرات A_{max} است.

باید توجه داشت که روند نرخ تغییرات پارامترهای التراسونیک در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن به ویژگی‌های سنگ‌های مورد مطالعه از جمله دوام آن‌ها بستگی دارد. بنابراین می‌توان همبستگی بین نرخ تغییرات پارامترهای التراسونیک و دوام سنگ‌ها را بررسی نمود. در شکل ۷ همبستگی بین دوام شکستگی نمونه‌ها در چرخه پانزدهم نرخ تغییرات V_p و A_{max} نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، نرخ تغییرت A_{max} همبستگی بیشتری به نسبت نرخ تغییرات V_p با دوام شکستگی نمونه‌ها دارد. این نتایج نشان می‌دهد نرخ تغییرات A_{max} بهتر می‌تواند دوام سنگ‌های مورد مطالعه را نشان دهد.

نگاه دقیقتر به ارقام اندازه‌گیری شده پارامترهای مختلف التراسونیک (جدول ۶) نشان می‌دهد در اثر تر و خشک شدن-های متوالی نمونه‌ها، V_p و A_{max} کاهش و α_s افزایش یافته است. تغییرات α_t نیز روند مشخصی را نشان نمی‌دهد و در برخی موارد افزایش و در برخی موارد دیگر کاهش یافته است. از آنجا که تغییرات V_p ، A_{max} و α_s تابع تغییرات درونی رخ داده در ساختار نمونه‌ها در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن است، می‌توان نرخ تغییرات پارامترهای التراسونیک را به مقدار تغییرات درونی نمونه‌ها در اثر تخریب فیزیکی ناشی از هوازدگی ارتباط داد. هر چه نرخ تغییرات پارامترهای التراسونیک بیشتر باشد، نشان دهنده این است که شدت تخریب درونی نمونه‌ها در اثر تر و خشک شدن بیشتر و به تبع آن دوام سنگ‌ها کمتر است (Ruedrich et al., 2011; Martínez et al., 2013). نرخ تغییرات هر یک از پارامترهای التراسونیک در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، نرخ تغییرات V_p نمونه‌ها نسبت به نرخ تغییرات A_{max} کمتر است. نرخ تغییر V_p در نمونه‌ها بین ۱ تا ۲۱/۵ درصد است. کمترین تغییر V_p در نمونه‌های آهکی L2، L3 و L4 و بیشترین تغییر V_p در نمونه‌های تراورتن رخ داده است. مقدار V_p در سنگ تراورتن T3 در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن در حدود ۲۲ درصد کاهش یافته است که بیشترین



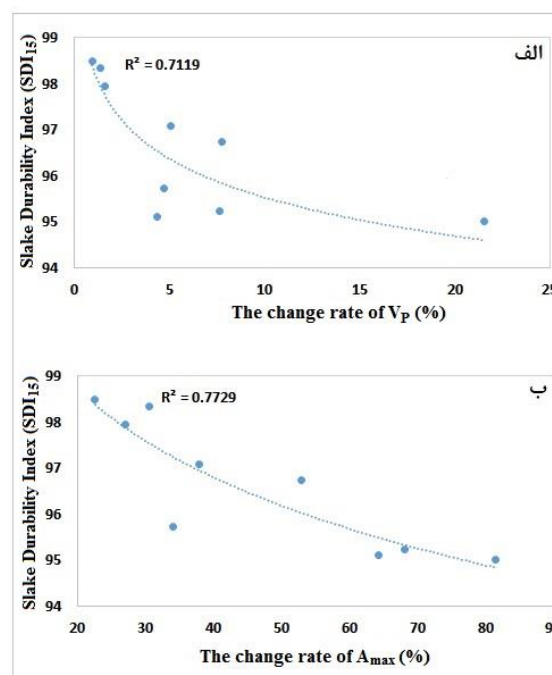
شکل ۶. نمودار امواج التراسونیک دریافتی از نمونه‌ها قبل و بعد از چرخه‌های تر و خشک شدن. الف L1، ب L2، ج L3، د L4، ه T1، و T2، ز T3، ح T4، ط T5

جدول ۷. نرخ تغییرات پارامترهای التراسونیک در نمونه‌های مورد مطالعه در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن

Sample code	The change rate of V_p (%)	The change rate of A_{max} (%)	The change rate of α_s (%)
L1	7.8	52.9	16.7
L2	0.9	22.6	12.2
L3	1.4	30.5	12.9
L4	1.6	26.9	12.3
T1	7.6	68.1	31.3
T2	4.4	64.2	29.1
T3	21.5	81.4	40.3
T4	4.7	34.1	9.5
T5	5.1	37.9	13.5

حرارت بسیار حساس است، دچار تغییر شکل‌های متفاوت در جهت‌های مختلف (directional dilatation) شود. این تغییر شکل‌های متفاوت کانی‌های کلسیت نیز به نوبه خود سبب ایجاد استرس در ساختار سنگ می‌شوند. استرس‌های متوالی ناشی از تغییرات حرارت نهایتاً باعث تشکیل میکروترک‌ها در درون سنگ می‌شوند که توسعه آن‌ها در طول زمان باعث زوال سنگ-های کلسیتی می‌شود (Ruedrich et al., 2011; Andriani and Germinario, 2014; Villarraga et al., 2018). بنابراین نتیجه چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن سنگ‌های مورد مطالعه، توسعه ریزترک‌ها در درون آن‌ها بوده است. باید توجه نمود که توسعه این ریزترک‌ها در ۵۰ چرخه در حدی نبوده که سبب کاهش وزن یا سبب تغییر در شکل ظاهری نمونه‌ها شود. اما اندازه‌گیری‌های التراسونیک قبل و بعد از چرخه‌ها، این تغییرات درونی را به خوبی آشکار نمود. این امر به این دلیل است که ویژگی‌های هر یک از پارامترهای امواج التراسونیک که از درون سنگ عبور می‌کند، به ویژگی‌های مسیر حرکت از جمله وجود هر نوع نقص (Defect) در ساختار یکپارچه سنگ بستگی دارد (Martínez-Martínez et al., 2013)، بنابراین ریزترک‌های ایجاد شده در اثر چرخه‌های هوازدگی بر روی پارامترهای التراسونیک تاثیر گذاشته و موجب تغییر آن‌ها می‌شوند.

بررسی نتایج نشان می‌دهد از بین دو پارامتر V_p و A_{max} پارامتر A_{max} حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات ایجاد شده در سنگ نشان می‌دهد. دلیل این امر پاسخ نامتناسب V_p به میزان تخریب درونی سنگ است. مارتینز-مارتینز و همکاران (Martínez-Martínez et al., 2011) پاسخ نامتناسب V_p به افزایش ریزترک‌ها را اینگونه توجیه می‌کنند که، هنگامی که یک موج التراسونیک در درون یک سنگ که دارای نقص‌هایی مانند حفرات، ترک‌ها و غیره است سیر می‌کند، بخشی از پیشانی موج توسط نقص‌ها دچار پراکندگی شده و در حرکت آن اختلال ایجاد می‌شود اما بخش دیگری از پیشانی موج که تحت تاثیر نارسایی‌های درون سنگ قرار نگرفته است، بدون هیچگونه تغییری به حرکت خود ادامه داده و در گیرنده دریافت می‌شود. بنابراین V_p به دست آمده معادل سرعت آن بخش از موج است که تحت تاثیر حفرات و ترک‌های مجزا در درون سنگ قرار



شکل ۷. همبستگی بین دوام شکستگی چرخه پانزدهم و نرخ تغییرات سرعت موج (الف) و نرخ تغییرات دامنه حداکثر موج (ب)

۴. بحث

نتایج آزمایش‌های دوام شکستگی و همچنین مقادیر α_s نشان می‌دهد سنگ‌های مطالعه شده از کیفیت خوب و دوام بالایی برخوردارند. از دلایل مهم دوام بالای سنگ‌های مورد مطالعه، تخلخل موثر کم و مقاومت نسبتاً زیاد آن‌ها است (Vazquez et al., 2013). با توجه به اینکه این سنگ‌ها دارای تخلخل موثر کمتر از ۱۰ درصد هستند، آب که یکی از عوامل مهم هوازدگی و تخریب فیزیکی سنگ است به راحتی نمی‌تواند به درون سنگ نفوذ کرده و باعث تخریب سنگ در طول زمان شود (De Kock et al., 2017). چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن در سنگ‌های غیر رسی مانند سنگ‌های تحقیق حاضر سبب افزایش تعداد و اندازه میکروترک‌های درون سنگ و به دنبال آن تخریب تدریجی سنگ می‌شوند (Sumner and Loubser, 2008; Loubser, 2013). از طرفی در طول چرخه‌های تر و خشک شدن، سنگ‌های مورد مطالعه در معرض چرخه‌های حرارتی گرم و سرد شدن بین ۲۰ تا ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نیز قرار می‌گیرند. چرخه‌های حرارتی موجب می‌شود کانی کلسیت که کانی اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های مورد مطالعه بوده و به

(جدول ۴ و جدول ۶) و موقعیت این نقاط با دقت کافی بر روی نمودار موج مشخص شده است. شیب خط AB تابع مقدار اختلاف A_{max} و $A_{10\%}$ (ΔA) و مقدار اختلاف T_{max} و $T_{10\%}$ (ΔT) است. در رابطه پیشنهاد شده توسط مارتینز-مارتینز و همکاران (Martínez-Martínez et al., 2011) برای محاسبه α_t (رابطه ۶)، ΔA نقشی ندارد و تنها ΔT تعیین کننده مقدار α_t است. به عنوان مثال مقدار α_t برای نمونه L3 قبل از چرخه ها $7/5$ dB/ms و پس از چرخه ها $7/4$ dB/ms است. این پارامتر در نمونه T3 نیز قبل و بعد از چرخه ها به ترتیب برابر $8/0.3$ و $8/0.1$ dB/ms است. همانطور که ملاحظه می شود، مقادیر α_t و تغییرات آن ها پس از چرخه های تر و خشک شدن با دامنه موج و تغییرات آن منطبق نیست (شکل ۸).

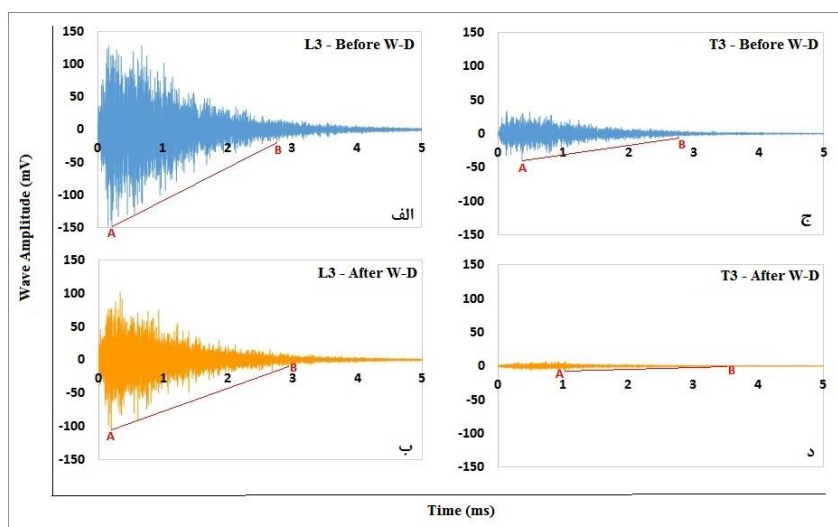
در تحقیق حاضر رابطه ۶ به صورت رابطه ۷ اصلاح شده است تا میرایی زمانی تطابق خیلی بهتری با دامنه موج داشته باشد. میرایی که از رابطه ۷ به دست می آید، میرایی زمانی اصلاح شده (α_{tc}) نامگذاری شده و معادل شیب خط AB بر روی نمودار موج است. نتایج این تحقیق نشان می دهد، با افزایش کیفیت و دوام سنگ ها مقدار α_{tc} نیز افزایش می یابد و به صورت بالعکس با کاهش کیفیت و دوام سنگ ها، مقدار α_{tc} نیز کاهش می یابد. به بیان ساده تر هرچه هوازدگی سنگ افزایش و کیفیت و دوام آن کاهش می یابد، شیب خط AB نیز کاهش می یابد. به صورت کلی با افزایش و پیشرفت هوازدگی در سنگ، نمودار موج التراسونیک به سمت هموار شدن پیش می رود (شکل ۸). در جدول ۸ مقدار α_{tc} نمونه های مورد مطالعه قبل و بعد از چرخه های هوازدگی و نرخ تغییرات آن و در شکل ۹ نیز همبستگی بین نرخ تغییرات α_{tc} و دوام شکستگی چرخه پانزدهم نمونه ها ارائه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، نرخ تغییرات α_{tc} در اثر چرخه های هوازدگی تر و خشک شدن، همبستگی خوبی با دوام شکستگی چرخه پانزدهم نمونه ها دارد.

$$\alpha_{tc} \text{ (mV/ms)} = (\Delta A / \Delta T) = (A_{max} - A_{10\%}) / (T_{max} - T_{10\%}) \quad (7)$$

نگرفته است. از طرف دیگر حفرات و ترک های مجزا در درون سنگ باعث پراکنش موج و کاهش انرژی آن و در نتیجه باعث افزایش میرایی و کاهش A_{max} می شوند. به همین دلیل A_{max} به نسبت V_p حساسیت بیشتری نسبت به افزایش ترک ها و حفرات در سنگ دارد.

دو پارامتر α_s و α_t از پارامترهای وابسته به دامنه موج هستند. نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد α_s نسبت به تغییرات درونی سنگ حساس است و می توان تغییرات آن را با میزان دوام سنگ ها انطباق داد اما α_t اینگونه نیست و روند تغییرات آن در چرخه های هوازدگی با میزان دوام سنگ ها انطباق ندارد. دلیل این امر می تواند روش محاسبه این پارامتر (رابطه ۶) باشد. همانطور که در رابطه ۶ مشاهده می شود، میرایی زمانی صرفاً تابع اختلاف T_{max} و $T_{10\%}$ است و اختلاف مقدار A_{max} و $A_{10\%}$ در آن نقشی ندارد و بنابراین برای همه نمونه ها همیشه $[\log(A_{max}/A_{10\%})]$ مساوی ۱ است.

نتایج تحقیق حاضر نشان می دهد در سنگ های با کیفیت و با دوام مانند نمونه L2، اختلاف A_{max} و $A_{10\%}$ زیاد است و با کاهش کیفیت و دوام سنگ ها مانند نمونه T3، مقدار اختلاف A_{max} و $A_{10\%}$ نیز کاهش می یابد. از طرفی با افزایش درجه هوازدگی و تخریب درونی سنگ نیز میزان اختلاف A_{max} و $A_{10\%}$ کاهش می یابد. نرخ کاهش اختلاف در نمونه های کم دوام، بیشتر است. این موضوع در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۸ نمودار امواج التراسونیک دریافتی از نمونه های L3 و T3 قبل و بعد از چرخه های تر و خشک شدن را نشان می دهد. خط AB بر روی نمودار موقعیت A_{max} را به موقعیت $A_{10\%}$ وصل می کند. مختصات نقطه A معادل (T_{max}, A_{max}) و مختصات نقطه B معادل $(T_{10\%}, A_{10\%})$ است. به بیان ساده تر نقطه B آخرین نقطه بر روی نمودار موج است که دامنه آن معادل ۱۰ درصد دامنه حداکثر (نقطه A) است. مختصات مربوط به نقاط A و B از داده های رقومی موج به دست آمده

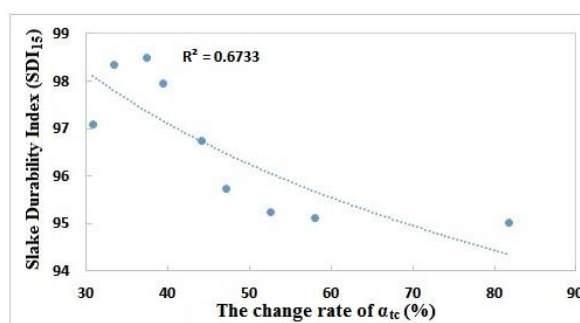


شکل ۸. نمودار امواج التراسونیک دریافتی از نمونه‌های L3 و T3 قبل و بعد از چرخه‌های تر و خشک شدن

نتایج به دست آمده نشان داد پارامترهای التراسونیک، ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌های کربناته را دقیق‌تر از ویژگی‌های مکانیکی پیش‌بینی می‌کنند. از بین پارامترهای مختلف، V_P بهتر می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های کربناته را پیش‌بینی کند. نتایج نشان داد A_{max} به نسبت V_P حساسیت بیشتری نسبت به توسعه ریزترک‌های ناشی از چرخه‌های تر و خشک شدن در سنگ دارد. حساسیت کمتر V_P نسبت به پیشرفت هوازادگی به دلیل پاسخ نامناسب این پارامتر به توسعه ریزترک‌ها در سنگ است. بنابراین در پیش‌بینی توسعه و پیشرفت هوازادگی در سنگ، A_{max} عملکرد بهتری در مقایسه با V_P دارد. α_s نیز به خوبی می‌تواند کیفیت و دوام سنگ را تعیین کند. α_t در مقایسه با سایر پارامترهای التراسونیک قابلیت بسیار کمی در پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و دوام سنگ دارد. اما در صورت تصحیح α_t و تبدیل آن به α_{tc} ، قابلیت این پارامتر در تعیین دوام سنگ و میزان پیشرفت هوازادگی در آن به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. به صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت برای تخمین و پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بهتر است از V_P استفاده شود اما برای تعیین کیفیت و دوام سنگ‌ها و همچنین تعیین میزان پیشرفت هوازادگی در سنگ در اثر چرخه‌های متوالی هوازادگی بهتر است از پارامترهای مربوط به دامنه موج و میرایی استفاده شود.

جدول ۸. میرایی زمانی اصلاح شده (α_{tc}) نمونه‌ها قبل و بعد از چرخه‌های تر و خشک شدن و نرخ تغییرات آن

Sample code	α_{tc} (mv/ms)		The change rate (%)
	Before W-D	After W-D	
L1	6.5	3.6	44.1
L2	129.9	81.2	37.4
L3	50.9	33.9	33.3
L4	84.1	50.9	39.4
T1	19.8	9.4	52.5
T2	18.3	7.6	58.1
T3	14.3	2.6	81.8
T4	10.4	5.5	47.1
T5	23.1	15.9	30.8



شکل ۹. همبستگی بین نرخ تغییرات α_{tc} و دوام شکستگی چرخه پانزدهم نمونه‌ها

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق قابلیت پارامترهای مختلف امواج التراسونیک شامل V_P ، A_{max} ، α_s و α_t در ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی و دوام سنگ‌های کربناته مورد بررسی قرار گرفت.

منابع

- Andriani, G.F., Germinario, L., 2014. Thermal decay of carbonate dimension stones: fabric, physical and mechanical changes, *Environmental Earth Sciences*, 72: 2523-2539.
- Anon, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. part 1: Rock and soil materials, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 19: 355-371.
- ASTM., 1994. Annual book of ASTM standards, soil and rock, building stones, Sect. 4, construction.
- Azimian, A., Ajalloeian, R., 2015. Empirical correlation of physical and properties of marly rocks with p wave velocity, *Arabian Journal of Geosciences*, 8(4): 2069-2079.
- Benavente, D., Martínez-Martínez, J., Jáuregui, P., Rodríguez, M.A., García-del-Cura, M.A., 2006. Assessment of the strength of building rocks using signal processing procedures, *Construction and Building Materials*, 20: 562-568.
- Benavente, D., Pla, C., Cueto, N., Galvañ, S., Martínez-Martínez, J., García-del-Cura, M.A., Ordóñez, S., 2015. Predicting water permeability in sedimentary rocks from capillary imbibition and pore structure, *Engineering Geology*, 195: 301-311.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering: New York, Wiley, xii, 251 p. p.
- De Kock, T., Turmel, A., Fronteau, G., Cnudde, V., 2017. Rock fabric heterogeneity and its influence on the petrophysical properties of a building limestone: Lede stone (Belgium) as an example, *Engineering Geology*, 216: 31-41.
- Franklin, J.A., Chandra, R., 1972. The slake-durability test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 9: 325-341.
- Gamble, J.C., 1971. Durability-plasticity classification of shale and other argillaceous rocks. PhD theses, University of Illinois.
- Ghafoori, M., Rastegarnia, A., Lashkaripour, GM., 2018. Estimation of static parameters based on dynamical and physical properties in limestone rocks, *Journal of African Earth Sciences*, 137: 22-31.
- Gökceoğlu, C., Ulusay, R., Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles, *Engineering Geology*, 57: 215-237.
- Hashemi, M., Bashiri Goudarzi M., Jamshidi, A., 2018. Experimental investigation on the performance of Schmidt hammer test in durability assessment of carbonate building stones against freeze–thaw weathering, *Environmental Earth Sciences*, 77:684.
- ISRM., 1981. Rock characterization, testing, and monitoring, ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford.
- Jamshidi, A., Nikudel, M.R., Khamsehchiyan. M., Zarei Sahamieh, R., Abdi, Y., 2016. A correlation between P-wave velocity and Schmidt hardness with mechanical properties of travertine building stones, *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 568.
- Karakul, H., Ulusay, R., 2013. Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46 (5): 981-999.
- Loubser, M., 2013. Weathering of basalt and sandstone by wetting and drying: A process isolation study, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95: 295-304.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., García-del-Cura, M.A., 2011. Spatial attenuation: The most sensitive ultrasonic parameter for detecting petrographic features and decay processes in carbonate rocks, *Engineering Geology*, 119: 84-95.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., García-del-Cura, M.A., 2012. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71: 263-268.
- Martínez-Martínez, J., Benavente, D., Gomez-Heras, M., Marco-Castaño, L., García-del-Cura, M.A., 2013. Non-linear decay of building stones during freeze–thaw weathering processes, *Construction and Building Materials*, 38: 443-454.
- Pappalardo, G., 2015. Correlation between P-wave velocity and physical–mechanical properties of intensely jointed dolostones, Peloritani Mounts, NE Sicily, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48 (4): 1711-1721.
- Ruedrich, J., Kirchner, D., Siegesmund, S., 2011. Physical weathering of building stones induced by freeze–thaw action: a laboratory long-term study, *Environmental Earth Sciences*, 63: 1573-1586.

-
- Sumner, P., Loubser, M., 2008. Experimental sandstone weathering using different wetting and drying moisture amplitudes, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33: 985-990.
- Vasanelli, E., Colangiuli, D., Calia, A., Sileo, M., Aiello, M.A., 2015. Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone, *Ultrasonics*, 60: 33-40.
- Vazquez, P., Alonso, F.J., Carrizo, L., Molina, E., Cultrone, G., Blanco, M., Zamora, I., 2013. Evaluation of the petrophysical properties of sedimentary building stones in order to establish quality criteria, *Construction and Building Materials*, 41: 868-878.
- Villarraga, C.J., Gasc-Barbierb, M., Vaunata, J., Darrozesc, J., 2018. The effect of thermal cycles on limestone mechanical degradation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 109: 115-123.
- Wang, P., Xu, J., Fang, X., Wang, P., Zheng, G., Wen, M., 2017. Ultrasonic time-frequency method to evaluate the deterioration properties of rock suffered from freeze-thaw weathering, *Cold Regions Science and Technology*, 143: 13-22.